دسته‌بندی سیگنال‌های آکوستیک امیشن حاصل از جدایش لایه‌ای در کامپوزیت‌های شیشه/ پلی‌استر با استفاده از ترکیب روش آنالیز اجزاء اصلی و روش فازی *

جهان تقی زاده(۱) مهدی احمدی نجف آبادی(۲)

چکیده *یکی از قابلیت‌های اکوستیک امیشن (Acoustic emission (AE)) تفکیک انواع خرابی‌ها در کامپوزیت‌های تحت بار می‌باشد. از طرفی مشکل اصلی در تحلیل و پردازش سیگنال‌ها، تفکیک و تمیز منابع خرابی می‌باشد؛ پس دسته‌بندی صحیح سیگنال اکوستیک می‌تواند در مباحث بازرسی و تفسیر، بسیار کمک کننده و انعکاسی از ساختار داخلی سازه باشد. در این مقاله دسته‌بندی بر مبنای ترکیب دو روش ارائه خواهد شد: روش اول مبتنی بر مبنای ریاضی بوده و به نام آنالیز اجزاء اصلی(Principal component analysis (PCA)) شناخته می‌شود که جهت کاهش ابعاد داده، به‌کار خواهد رفت و روش دوم به نام روش فازی (Fuzzy Clustering means (FCM)) است که پیرو داده‌های بهینه شده از آنالیز اجزاء اصلی، دسته‌بندی را انجام خواهد داد. از کامپوزیت تک جهته شیشه / پلی استر با چیدمان گوناگون و تحت بار گذاری مد I، جهت اعتبار سنجی این تکنیک‌ها استفاده و در نهایت از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning electron microscopy (SEM)) جهت صحه گذاری دسته‌بندی روش فازی بهره برداری خواهد شد.*

واژه‌های کلیدی اکوستیک امیشن، کامپوزیت، آنالیز اجزاء اصلی، روش فازی

Classification of Acoustic Emission Signals Collected During Mode I Delamination on Glass/Polyester Composites by Integration of the Principal Component Analysis and Fuzzy Clustering Means

J. Taghizadeh M. Ahmadi Nadjafabadi

Abstract *Acoustic emission (AE) can be use to discriminate the different types of damage occurring in a constrained composite. However, the main problem associated with data analysis is the discrimination between the different acoustic emission sources. The objective of the cluster analysis is to separate a set of data into several classes that reflect the internal structure of the data. Indeed, cluster analysis is an important tool for investigating and interpreting data. In this paper, we intend to use two kinds of classifier techniques: a mathematical procedure that is called principal component analysis (PCA) and an unsupervised one fuzzy clustering means (FCM). Glass/polyester composites specimens used for the validation of the proposed methodologies. We worked on glass/polyester unidirectional specimens, subjected to duration of Mode I delamination within different configurations, awaiting preferential damage modes in the material.*

Key Words acoustic emission, glass/polyester composite, PCA, FCM

---

*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۹/۱۰/۲۷ و نسخه پذیرش آن در تاریخ ۸۹/۱۲/۲۳ و نسخه آماده چاپ در تاریخ ۹۰/٤/۲۵ به دفتر نشریه رسیده‌است.

(۱) نویسنده مسؤول: دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مقدمه

از حدود نیم قرن پیش، تقاضا برای موادی با استحکام و سفتی بالا و همچنین وزن کم در صنایع مختلف افزایش یافت و چون هیچ ماده تک جزئی قادر به پاسخگویی به این نیازها نبود، نظریه کامپوزیت‌ها شکل گرفت [1]. مزیت کامپوزیت‌ها در این است که بهترین خصوصیات اجزاء تشکیل دهنده خود را نشان می‌دهد و دارای ویژگی‌هایی است که درهیچ یک از اجزاء آن، به تنهایی مشاهده نمی‌شود [2]. کامپوزیت های الیافی، از دو جزء رشته (Fiber) و زمینه (Matrix) تشکیل شده‌اند که رشته ها را می‌توان در جهات مختلف در زمینه قرار داد و این کار باعث افزایش مقاومت کامپوزیت در آن جهت می‌شود. از طرفی وجود خرابی در کامپوزیت ها باعث افت استحکام آن، به خصوص حین بار خواهد شد. بنابراین شناسایی این خرابی‌ها ضروری است.

طبق نظر هیرای (Hirai) و همکاران [3] استحکام متفاوت چسبندگی الیاف به رزین، باعث تغییر نوع شکست در مواد کامپوزیتی می‌شود. به‌طوری‌که سطح الیافی که با روش الکتروشیمیایی عمل آوری شده اند اغلب دارای مد شکست در رزین است؛ در حالی که برای سطوحی که با استفاده از روش پلاسما عمل آوری شده اند، مد شکست غالب جدا شدگی الیاف از رزین میباشد. مشابه همین کار بر روی الیاف کربن پوشش داده شده به روش پلاسما انجام شده است که مدهای شکست را تحت بارهای حرارتی نشان می‌دهد.

میناک(Minak) و همکاران [4] معتقدند اگر چه محققین زیادی مسأله مربوط به خرابی را در کامپوزیت‌ها با روش‌های مختلف غیرمخرب مورد مطالعه قرار داده‌اند اما باز هم برخی از مسائل جای بحث و بررسی دارد که از جمله آنها جدایش لایه‌ای با بهره‌گیری از روش آکوستیک امیشن می‌باشد.

در مبحث پردازش داده‌های مربوط به جدایش لایه‌ای، روش‌های متعدد عددی و تجربی به‌کار گرفته شده است و چگونگی شروع و انتشار پدیده جدایش لایه‌ای، با در نظر گرفتن شرایطی مثل نوع الیاف، رزین و چیدمان لایه‌ها مورد بحث قرار گرفته و معیارهای مختلفی در این زمینه حاصل شده است. از جمله این معیارها می‌توان به روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی (Artificial neural network(ANN))، تحلیل هارنست (Hurnest analysis)، موجک (Wavelet) و ... اشاره کرد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد و تک به تک جهت احراز انواع خرابی کامپوزیت‌ها از جمله جدایش لایه‌ای به‌کار رفته‌اند. و لیکن تاکنون در مورد تلفیق دو روش آنالیز اجزا اصلی و روش فازی که نتایج دقیق‌تری نسبت به نتایج تصاویر میکروسکوپی دارد، کاری انجام نشده است که در تحقیق حاضر به آن پرداخته خواهد شد.

سورنسن و ژاکوبسن (Sorensen, Jacobsen) [5] بیان می‌کنند که جدایش لایه‌ای، یکی از مودهای شکست در کامپوزیتهاست که باعث شکست قطعه به چندین قسمت و در نتیجه باعث کاهش استحکام نهایی سازه در حین سرویس دهی خواهد شد. همچنین مارات و مانول (Marat, Manuel) [6] معتقدند که جدایش لایه‌ای سبب جلو انداختن کمانش لایه‌ها، ارتعاشات بیش از حد، نفوذ رطوبت، افت سفتی و کاهش عمر خستگی خواهد شد. از طرفی مطابق تحقیقات لوتوس و کوستوپولوس (Loutas, Kostopoulos) [7] عیب جدایش لایه‌ای به‌خاطر زیر سطحی بودن، قابل شناسایی و تشخیص توسط چشم نمی‌باشد؛ لذا نیاز به ابزارهایی است که بتوان آن را مشاهده کرد. از طرف دیگر این عیب در حین سرویس‌دهی سازه ظاهر می‌شود؛ بنابراین بر اساس تحقیقات کآاو آوونی (Kaewwaewnoi) و همکاران [8] استفاده از روشی که بتواند سازه را حین سرویس پایش کرده و اطلاعات مربوطه را به‌دست آورد، مفید و کارساز خواهد بود.

پایش بلادرنگ (Real time) با بهره‌گیری از

روش آکوستیک امیشن، به خاطر مزایای ترجیحی‌اش جزء مواردی است که بسیار مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. انتشار امواج تنشی در سازه‌های تحت بار را پدیده آکوستیک امیشن می‌نامند و در محدوده فراصوتی ۲۰ کیلو تا ۱ مگا هرتز، رخ می‌دهد و از آنجا که شکل موج‌ها (Waveforms) حاوی اطلاعاتی از قبیل محل، نوع و اندازه منبع هستند، بنابراین دریافت صحیح و به‌موقع این امواج می‌تواند به عنوان یک روش غیر مخرب برای پیدا کردن عیوب سازه‌های تحت بار مورد استفاده قرار گیرد [9].

امیر رفاهی و مهدی احمدی [10] بیان می‌کنند: که با استفاده از پدیده آکوستیک امیشن در زمینه مطالعه انواع مودهای خرابی کامپوزیت‌ها مطالعات زیادی انجام گرفته و روش‌های عددی مختلفی جهت ارتباط بین پارامترهای آکوستیکی به نوع خرابی تعریف شده است. از آنجا که ارتباط بین داده‌های آکوستیکی و داده‌های مکانیکی نقش مؤثری در تحلیل و آنالیز خرابی‌ها در سازه کامپوزیتی می‌تواند ایفا کند، پس به کمک این دیدگاه می‌توان شروع و انتشار انواع مودهای خرابی، سهم هر مود و حتی میزان حد تحمل و عمر باقی‌مانده سازه را کشف کرد.

سونگ و ناک (Sung, Nak) [11] معتقدند: شناخت پارامترهای آکوستیکی مود جدایش لایه‌ای در حین پایش کامپوزیت، نقش به‌سزایی در کاهش خسارت و کاهش هزینه‌ها خواهد داشت. بنابر این در این تحقیق روش غیر مخرب آکوستیک امیشن، جهت شناسایی عیب جدایش لایه‌ای کامپوزیت به‌کار برده شده است. بدین صورت که برای کامپوزیت شیشه/پلی‌استر با لایه چینی‌های گوناگون با ایجاد عیب جدایش لایه‌ای طبق استانداردASTM D۵۰۲۸، سیگنال‌های به‌دست آمده توسط حسگرهای (Sensor) آکوستیکی، جمع‌آوری و سپس پردازش خواهد شد. از طرفی سیگنال‌های جدایش لایه‌ای، ترکیبی از سیگنال‌های مودهای مختلف خرابی است و با تصاویر میکروسکوپی سطوح خرابی، بر این ادعا صحه گذاشته شده است. لذا شناسایی رفتار آکوستیکی تک تک این مودها ضروری است که برای نیل به این هدف از آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM D۳۰۳۹ استفاده می‌شود. در ادامه با استفاده از روش آنالیز اجزا اصلی ابعاد داده‌ها بهینه و سپس دسته‌بندی داده‌های بهینه با روش فازی انجام خواهد شد. انطباق نتایج دسته‌بندی روش فازی به تعداد مودهای خرابی تصاویر میکروسکوپی دلیلی بر توانایی روش فازی و صحت داده‌های آکوستیک امیشن خواهد بود.

تکنیک‌های دسته‌بندی

با توجه به این‌که بعد پارامترهای حاصل از سیگنال‌ها زیاد می‌باشد، لذا نیاز برای کاهش ابعادی پارامترها و همچنین دسته‌بندی داده‌ها ضروری می‌باشد که در این مقاله جهت کاهش ابعادی پارمترها از آنالیز اجزا اصلی و جهت دسته‌بندی از روش فازی استفاده شده است. در محیط جعبه ابزار ریاضی MATLAB روش‌های PCA و FCM تعریف و با پارامترهای آکوستیکی که توسط دستگاه جمع آوری شده نتایج عددی بهینه و دسته‌بندی خواهد شد.

روش آنالیز اجزا اصلی. آنالیز اجزا اصلی، یک تکنیک مفید آماری است که برای یافتن الگوها در داده‌ها با بعد زیاد کاربرد دارد. به بیان دیگر این تکنیک راهی است برای شناسایی الگوها در مجموعه داده‌ها و نشان دادن داده‌ها به‌طریقی که شباهت‌ها و اختلاف‌ها را برجسته نماید. به عبارتی این تکنیک در بردارنده‌ی یک رویه ریاضی است که تعدادی متغیر همبسته را تبدیل به تعداد کمتری متغیر نا همبسته می‌کند که به آنها اجزا اصلی می‌گوییم [12].

اگر n سیگنال آکوستیکی وجود داشته باشد که هر سیگنال دارای m پارامتر زمانی باشد در این حالت یک ماتریس $n \times m$، وجود خواهد داشت:

$$X=\begin{bmatrix}x_1^t\\x_2^t\\\vdots\\x_n^t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^m\\x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^m\\\vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^m\end{bmatrix} \quad (۳)$$

که x_i (i=1,2,…,n) بیانگر بردارهای سیگنال‌ها بوده و t ترانهاده بردارها می‌باشد. ابتدا داده‌ها استانداردسازی می‌شوند که در این حالت برای هر ستون انحراف استاندارد محاسبه شده و بعد از نرمال سازی می‌توان کواریانس بین داده‌ها را به‌دست آورد [12]:

$$s=\left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{الف}-٤)$$

$$x_{normalized}=\frac{2.(x-x_{\min})}{(x_{\max}-x_{\min})}-1 \quad (\text{ب}-٤)$$

$$C_X=E\left[XX^t\right] \quad (\text{ج}-٤)$$

که مVلفه های ماتریس C_X،

C_{kl} (k=1,2,…,m, l=1,2,…,m)

کواریانس بین متغیرهای x^k , x^l را نشان می‌دهد:

$$x^k=\begin{bmatrix}x_1^k\\x_2^k\\\vdots\\x_n^k\end{bmatrix},\quad x^l=\begin{bmatrix}x_1^l\\x_2^l\\\vdots\\x_n^l\end{bmatrix} \quad (۵)$$

از آنجا که ماتریس کواریانس یک ماتریس متقارن است، یک پایه متعامد با پیدا کردن مقادیر ویژه و بردارهای ویژه قابل محاسبه است که بردارهای ویژه e_k و مقادیر ویژه λ_k جواب‌های معادله زیر می‌باشند:

$$C_x e_k=\lambda_k e_k,\quad k=1,2,3,\cdots,m \quad (٦)$$

فضای متعامد ایجاد شده برای یک سری از بردارهای ویژه دارای بیشترین واریانس در یک جهت خاص می‌باشد. لذا جهت‌هایی که در آنها، مجموعه داده‌ها دارای انرژی بیشتری باشند، می‌تواند پیدا شود. بنابراین به جای استفاده از بردار ویژه ماتریس کواریانس، می‌توانیم داده‌ها را با چندین بردار از فضای متعامد نمایش دهیم. اگر $A_K(m\times K)$ ماتریس با K بردار ویژه اول باشد، با تبدیل بردار داده‌ها، X خواهیم داشت:

$$y=XA_K \quad (٧)$$

که این معادله محورهای جدیدی از n حادثه (سیگنال آکوستیکی) را در سیستم محورهای متعامد با بردارهای ویژه تعریف شده، نشان میدهد.

روش فازی. روش فازی یک تکنیک دسته‌بندی است که در آن هر داده متعلق به یک دسته است که با تابع عضویت قابل بیان است [13]. فرض کنیم n داده به c کلاس باید دسته‌بندی شوند و هرنمونه‌ای از داده‌ها، x_i، توسط m مشخصه تعریف گردند یعنی:

$$X=\{x_1,x_2,\ldots x_n\},\ x_i=\{x_i^1,x_i^2,\ldots x_i^m\}$$

از آنجا که m مشخصه، دارای یکاهای متفاوت است، باید هر مشخصه قبل از دسته‌بندی، با مقیاس خاصی نرمال‌سازی شود [14]. روش تابع هدف برای دسته‌بندی n داده به c کلاس مختلف به‌کار گرفته می‌شود که مقصد اصلی تابع هدف مینیمم کردن فاصله بین داده‌ها در یک دسته خاص از نقطه ای به‌نام نقطه مرکزی آن دسته و ماکزیمم کردن فاصله بین نقاط مرکزی هر دسته نسبت به دسته دیگر می‌باشد. می‌توان خانواده مجموعه فازی داده‌های X را با روش فازی که شامل c کلاس می‌باشد به‌صورت Ai, i = { 1,2, .., c} تعریف کرد. با توجه به اینکه هر داده با درجه‌ای، متعلق به کلاس است، پس برای نقطه‌ای مثل x_k مقادیر تابع عضویت در کلاس i-ام به این صورت

خواهد بود:

$$\mu_{ik} = \mu_{Ai}(x_k) \in [0,1] \quad (۸)$$

بدیهی است که مجموع تمامی مقادیر عضویت برای یک نقطه خاص در تمامی کلاس‌ها برابر با یک خواهد بود:

$$\sum_{i=1}^{c} \mu_{ik} = 1 \qquad \forall k = 1,2,...,n \quad (۹)$$

حال اگر تابع هدف به شکل زیر تعریف گردد:

$$J(\mu, v) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} (\mu_{ik})^m (d_{ik})^2 \quad (۱۰)$$

که در آن d_{ik} فاصله بین نقطه x_k از مرکز v_i است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \left[\sum_{j=1}^{m} (x_{kj} - v_{ij})^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۱)$$

که μ_{ik}، مقدار عضویت k–امین داده در کلاس i –ام و 'm، پارامتر وزنی که مقدار فازی بودن دسته‌بندی را معین می‌کند؛ که برای مقادیر 'm برابر با یک، مقادیر تابع عضویت به یک و صفر تبدیل خواهند شد. همچنین v_i مرکز کلاس i–ام خواهد بود.

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} (\mu_{ik})^m . x_k}{\sum_{k=1}^{n} (\mu_{ik})^m} \quad (۱۲)$$

در فرایند دسته‌بندی فازی بعد از تعیین تعداد کلاس‌ها برای داده‌ها، ماتریس تابع عضویت μ با مقادیری بین صفر تا یک به‌صورت رندمی انتخاب و سپس برای هر کدام از نقاط این مقادیر اختصاص داده می‌شود. سپس مقادیر مربوط به مراکز کلاس‌ها تعیین شده و دوباره مقادیر ماتریس عضویت از نو محاسبه می‌شود و این عملیات تا جایی تکرار می‌شود که رابطه زیر برقرار گردد:

$$\left\| \mu^{r+1} - \mu^{r} \right\| \le \varepsilon \quad (۱۳)$$

که r تعداد گام های تکرار است و ε مقدار خطا که نسبت به گام قبلی محاسبه می‌شود و باید از یک حد تعیین شده کمتر باشد تا اینکه عملیات دسته‌بندی متوقف شده و کامل گردد.

تجهیزات لازم

هدف آزمایش‌ها مطالعه بر روی سیگنال‌های ساطع شده از خرابی و کشف رابطه‌ی بین داده‌های مکانیکی و داده‌های آکوستیکی است. برای رسیدن به این هدف ارزیابی همزمان رفتار مکانیکی و رفتار اکوستیکی کامپوزیت های شیشه/پلی‌استر تحت جدایش لایه‌ای مورد نظر می‌باشد.

بارگذاری جدایش لایه‌ای توسط دستگاه انیورسال کشش مجهز به سامانه بال اسکرو (Ball screw) انجام گرفت که سرعت حرکت فک این دستگاه به‌صورت جابجایی ثابت و محدوده حرکتی از ۰/۱ mm/min تا ۵۰۰ mm/min و ماکزیمم تناژ آن ۵۰۰۰kgf است.

شناسایی سیگنال‌های آکوستیکی ناشی از بارگذاری جدایش لایه‌ای در سامانه آکوستیک امیشن دو کاناله با استفاده از حسگرهای مدرن (بر پایه فیبر نوری) انجام گرفت. سیگنال‌ها به‌وسیله تقویت‌کننده‌ها (Amplifier) ، تقویت و با استفاده از فیلترهای میان‌گذر، فیلتر می‌شوند. سامانه ی جمع آوری داده‌ها در مدت فرایند آزمایش، داده‌ها را ثبت و سپس نرم‌افزار، تک تک سیگنال‌ها را استخراج و در صفحه نمایش نشان می‌دهد. در دستگاه مورد نظر، حد آستانه (Threshold) برای هر دو حسگر ۳۰ دسی بل و فرکانس نمونه برداری ۱ مگا هرتز، تنظیم شده است.

برای صحه گذاری بر فرایند ایجاد خرابی‌ها از میکروسکوپ الکترونی فیلیپس (Philips) مدل ۳۰XL استفاده شد. قبل از به‌کارگیری دستگاه از پاشش طلا (Gold sputtering) به منظور هادی ساختن نمونه کامپوزیتی نارسانا استفاده شد. به علت وجود جریان

خلأ در محفظه اسکن، جهت جلوگیری از حرکت الیاف منطقه شکست، از چسب استفاده گردید.

مواد استفاده شده شامل الیاف شیشه با رزین پلی استر بوده که بعضی از مشخصات مکانیکی آنها در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به نوع آزمایش‌ها این الیاف در داخل رزین در زوایای مختلفی قرار گرفته و با استفاده از روش لایه گذاری دستی ساخته شده‌اند.

آزمایش‌های انجام گرفته

آزمایش رزین خالص. در رزین خالص پلی‌استر به ابعاد mm ۱۴۰×۱۲×۸ در اثر کشش طبق استاندارد ASTM D۳۰۳۹ ، ریز ترک‌های داخل رزین شروع به رشد کرده و در نهایت به شکست خواهد انجامید. به دلیل احتمال وجود نویزهای محیطی و نویزهای مربوط به لغزش نمونه در داخل فک‌ها از دو حسگر استفاده شد، تا فقط داده‌های بین دو حسگر را مورد پایش قرار دهد. حسگرها به‌وسیله گریس یا عسل به سطح نمونه چسبانده می‌شوند تا تضعیف امواج آکوستیکی را به حداقل برساند. شکل (۱) سامانه آزمایش کشش را بر روی رزین پلی استر نشان می‌دهد. برای اینکه ترک خوردگی از یک محل خاص شروع شود، وسط نمونه کاهش ضخامت داده می‌شود تا تمرکز تنش در این ناحیه بیشتر باشد. سرعت حرکت فک‌ها در این آزمایش برابر با mm/min ۲ می‌باشد.

آزمایش الیاف. آزمایش الیاف در دو حالت مختلف به انجام رسید: الیاف بدون رزین و الیاف در داخل رزین. دلیل استفاده از دو روش مختلف برای آزمایش الیاف یکی مقایسه نوع شکست الیاف در دو محیط مختلف و دیگری ایجاد مود خرابی جدایش (Debonding) الیاف از رزین بود.

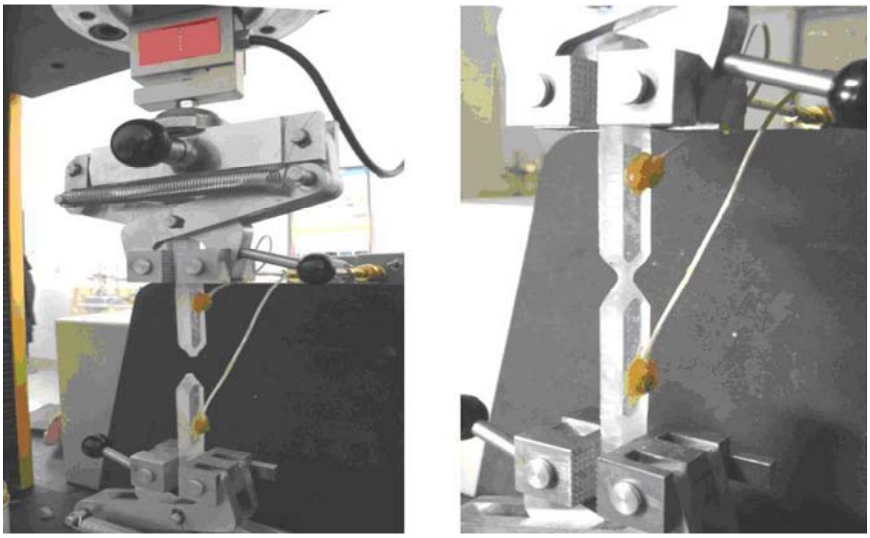
آزمایش الیاف بدون رزین. شکل (۲) سامانه آزمایش الیاف خالص را نشان می‌دهد. طول دسته (Fiber bundle) الیاف mm ۱۰۰ بوده و برای بستن الیاف به فک‌های نگهدارنده دستگاه کشش، ابتدا دو انتهای الیاف به اندازه mm ۱۵ به‌وسیله چسب اپوکسی مخصوص، قالب بندی شده و پس از سفت شدن چسب، در داخل گیره‌های نگهدارنده قرار داده و آزمایش کشش تک محوری بر روی آنها انجام می‌شود. بارگذاری الیاف با سرعت ثابت mm/min ۰/۲ بوده و حسگرها در دو انتهای فک‌ها توسط گریس چسبانده می‌شوند.

آزمایش الیاف در داخل رزین. الیاف در داخل رزین در دو جهت، موازی با جهت نیرو و عمود بر جهت نیرو قرار داده شد. طبیعتاً، مود خرابی در دو حالت فرق خواهد داشت. برای الیاف در جهت بارگذاری بیشتر سیگنال‌ها مربوط به شکست الیاف در داخل رزین و برای الیاف عمود بر جهت بارگذاری شامل جدایش الیاف از رزین می‌باشد. بدیهی است که در هر دو حالت، شکست رزین هم اتفاق می‌افتد.

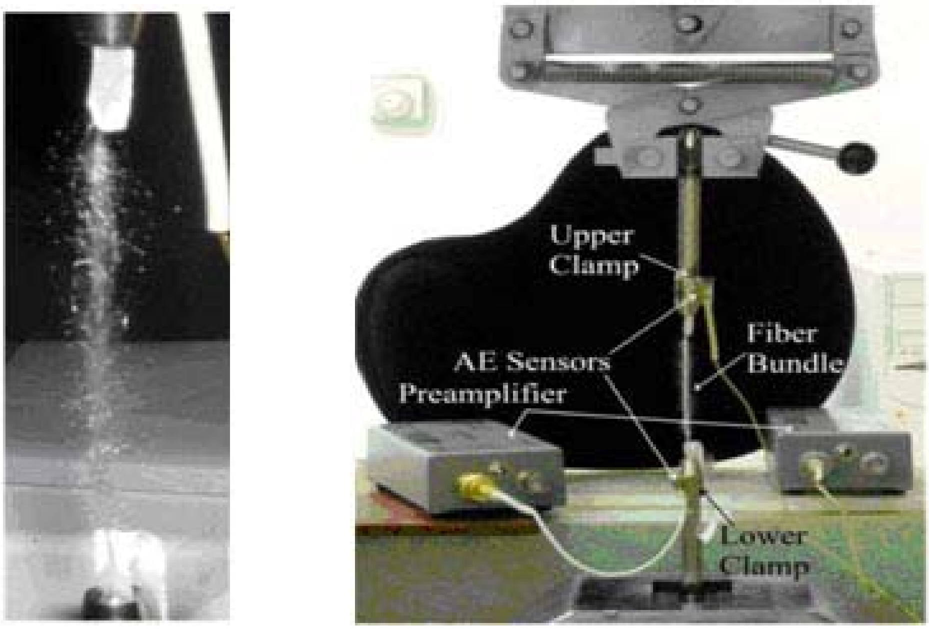
آزمایش جدایش لایه‌ای. برای آزمایش جدایش لایه‌ای نمونه‌ها با ابعاد mm ۲۰۰×۲۰×۵ فراهم گردید. بر اساس استاندارد ASTM D۵۵۲۸ طول ترک اولیه (Precrack) برابر با ٦۰ میلیمتر است. آزمایش جدایش لایه‌ای در سرعت‌های mm/min ۵ برای تمامی نمونه‌ها انجام شد. شکل (۳) سامانه آزمایش جدایش لایه‌ای واقعی را نشان می‌دهد. در نمونه‌ها از لایه‌چینی‌های $[0^\circ]_{8s}$ و $[0,90,-45,45,0,90,-45,+45]_{2s}$ استفاده شده است که مودهای خرابی ترکیبی در آنها ایجاد گردید.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی الیاف شیشه و رزین پلی استر

نمونه	دانسیته(g/cm^3)	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست کششی(٪)
فیبر شیشه	۱/۱	۲۱۵۰	۷٤	۲/٦
رزین پلی استر	۲/٦	۸۰	۲/۷	۳

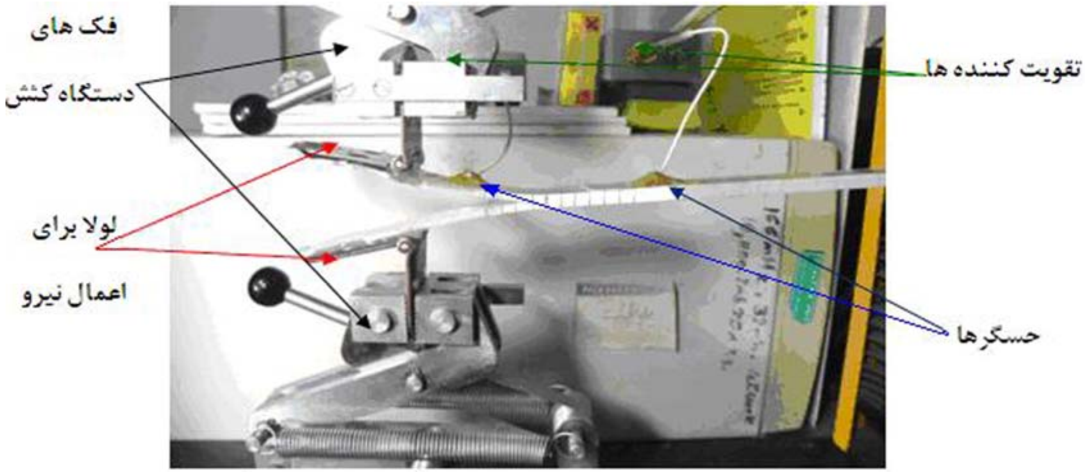


شکل۱ سامانه آزمایش کشش و سامانه آکوستیک امیشن برای رزین پلی‌استر

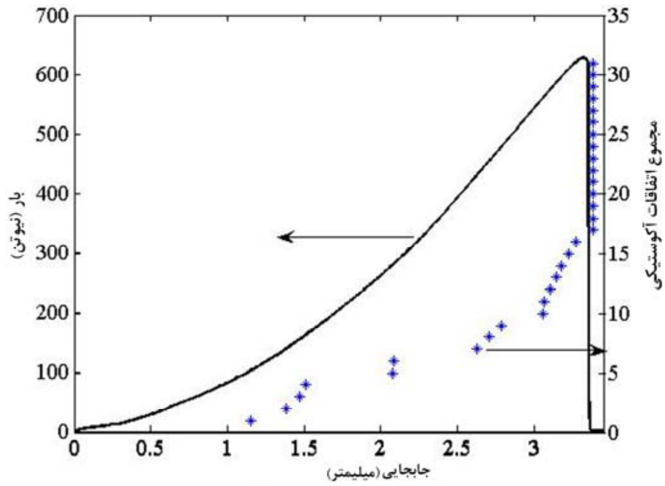


(ب) (الف)

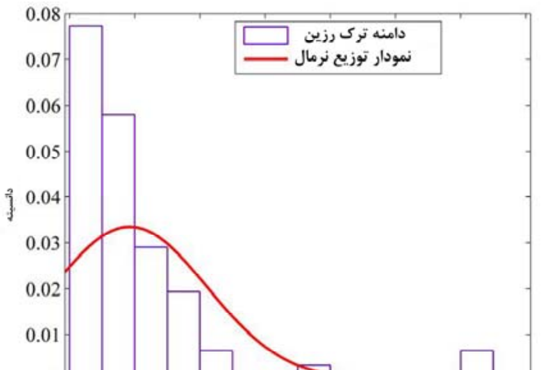
شکل ۲ سامانه آزمایش الیاف بدون رزین. الف) حسگرها و محل نصب آنها ب) الیاف پس از بارگذاری و شکست



شکل ۳ سامانه تجهیزات استفاده شده در آزمایش جدایش لایه‌ای مدI



شکل ٤ منحنی نیرو و اتفاقات تجمعی بر حسب جابجایی برای ترک خوردگی رزین



شکل ٥ توزیع دامنه سیگنال‌های آکوستیکی در اثر ترک خوردگی رزین حین آزمایش کشش

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش رزین خالص. طبق شکل (٤) از روی منحنی نیرو و اتفاقات آکوستیکی (AE Event) همچنان‌که دیده می‌شود، ناحیه پلاستیک در پلی‌استر خالص وجود ندارد و در مراحل اولیه بارگذاری ابتدا ترک‌های ریز در داخل رزین ایجاد و رشد کرده و پس از انباشتگی ترک‌ها، شکست نهایی اتفاق خواهد افتاد. از آنجا که در مراحل نهایی سیگنال‌های زیادی در بازه زمانی کمتر اتفاق افتاده، لذا نمودار اتفاقات تجمعی به‌صورت ناگهانی سیر صعودی را طی کرده است. در شکل (٥) توزیع دامنه سیگنال‌های ترک خوردگی رزین آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دامنه سیگنال ترک خوردگی رزین پلی‌استر، بین ۳۰ تا ٤٥ دسی بل می‌باشد که با نتایج حاصل از کارهای انجام شده محققان قبلی در تطابق کامل می‌باشد [15-16]. در ضمن فرکانس مرتبط با این دامنه به مقدار ۲۰۰–۱۰۰ کیلو هرتز، رصد شد.

نتایج آزمایش الیاف

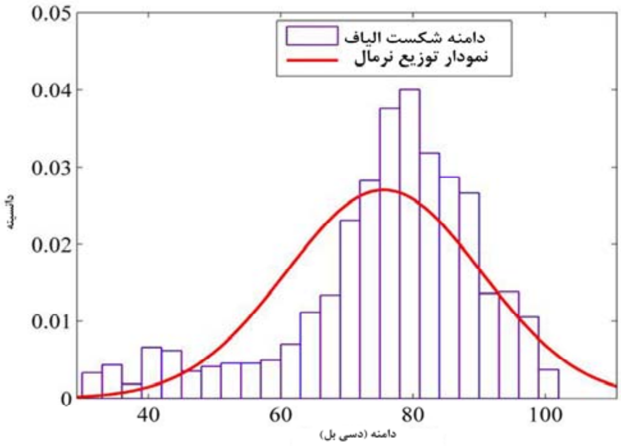
الیاف بدون رزین. از جمله پارامترهای مهمی که در تحلیل داده‌های آکوستیکی کاربرد دارد، دامنه و فرکانس های امواج می‌باشد. چراکه امواج به‌دست آمده از اتفاقات مختلف دارای پارامترهای منحصر به‌فردی هستند که می‌توانند در پیدا کردن ارتباط امواج آکوستیکی با یک حادثه خاص، مفید باشند. شکل (٦) توزیع دامنه شکست الیاف را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود برای الیاف محدوده دامنه شکست در بازه ۷۰ تا ۱۰۰ دسی بل می‌باشد. البته در بازه ۳۰ تا ۷۰ دسی بل نیز دامنه شکست الیاف توزیع شده است و دلیل اصلی آن بیشتر به خاطر وجود اصطکاک بین لیف‌ها می‌باشد که در صورت استفاده از روغن هنگام آزمایش کشش الیاف می‌توان اصطکاک را تا حدودی کاهش و از ایجاد این دامنه جلوگیری کرد.

در صورتی که فرکانس توزیع دامنه در دو بازه بالا و پایین را با روش فرکانسی مورد مقایسه قرار دهیم، می‌توان فرکانس‌های شکست را از فرکانس‌های اصطکاک بین الیاف تشخیص و تمیز داد. به‌طوری‌که فرکانسی بالاتر از ٤۰۰ کیلو هرتز مربوط به شکست الیاف و بازه فرکانسی بین ۱۵۰ kHz تا ۲۵۰ kHz مربوط به اصطکاک بین لیف‌ها خواهد بود.

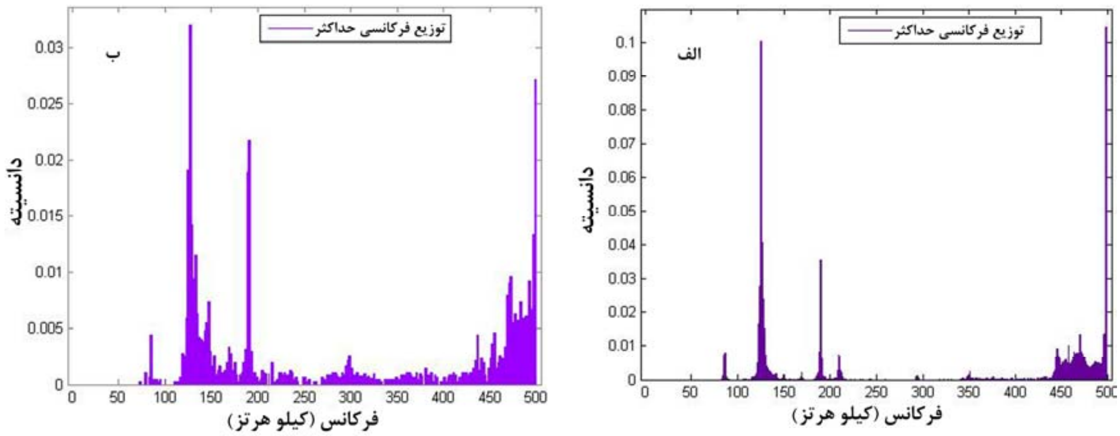
نتایج آزمایش الیاف در داخل رزین. در نمودارهای شکل (۷) توزیع فرکانس امواج ساطع شده برای نمونه‌های بارگذاری شده در جهت الیاف و عمود بر جهت الیاف آورده شده است. همان‌طورکه دیده می‌شود نمودارها تقریباً شبیه یکدیگر هستند؛ ولی در مورد نمونه‌ای که الیاف عمود بر جهت بارگذاری بوده‌اند سیگنال‌هایی در بازه فرکانسی جدایش الیاف از رزین (۲۵۰ kHz تا ۳۵۰ kHz) نیز مشاهده شده است که در ارتباط با جدایش (Debonding) الیاف از زمینه خواهد بود. ضمناً دامنه مرتبط با این خرابی ۵۰ تا ۷۰ دسی بل می‌باشد.

طبق اطلاعات قبلی به‌دست آمده و اطلاعات الیاف داخل رزین می‌توان نتیجه گرفت که در الیاف عمود بر جهت بارگذاری ابتدا ترک خوردگی رزین غالب بوده و سپس با افزایش نیرو جدایش الیاف از رزین ایجاد خواهد شد که اگر بارگذاری ادامه یابد آنگاه شکست سوم که همان شکست الیاف است نیز اتفاق می‌افتد.

نتایج نهایی آزمایش‌های این بخش حاکی از این واقعیت است که فرکانس ثبت شده برای شکست الیاف خالص و شکست الیاف در داخل رزین با هر موقعیتی، اختلاف نخواهد داشت. از آنجا که بازه فرکانسی خرابی‌ها در این کار مهم می‌باشد بنابراین بدون هیچ تردیدی می‌توان در مورد داده‌های فرکانسی بوجود آمده از خرابی‌های مختلف الیاف در داخل رزین نیز با قطعیت اظهار نظر کرد.

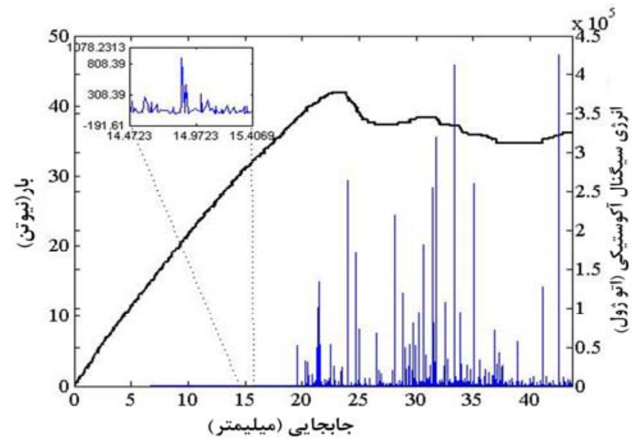


شکل ٦ توزیع دامنه مربوط به شکست الیاف



(ب)　　　　　(الف)

شکل ۷ توزیع فرکانسی شکست های اتفاق افتاده الیاف در داخل رزین الف) بارگذاری شده در جهت الیاف ب) بارگذاری شده در جهت عمود بر الیاف



شکل ۸ نمودار بارگذاری قطعات آزمایش جدایش لایه‌ای و سیگنال‌های آکوستیکی ناشی از آن

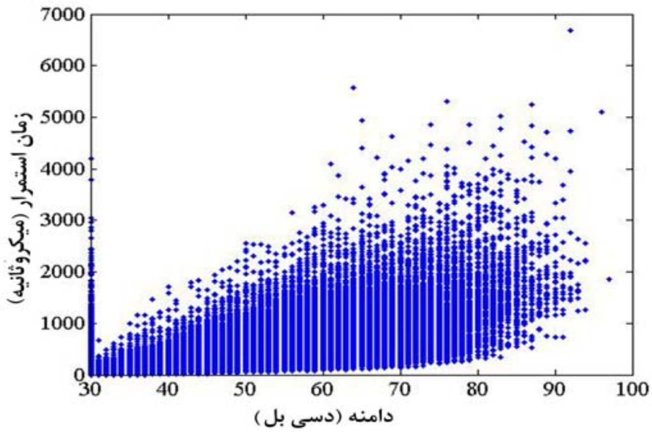
نتایج آزمایش جدایش لایه‌ای. شکل (۸) تغییرات نیرو – جابجایی را به‌همراه انرژی آکوستیکی–جابجایی را برای یک آزمایش جدایش لایه‌ای نشان می‌دهد. این نمودار در مرحله اولیه بارگذاری دارای رابطه نسبتاً خطی بوده و سپس از حالت خطی خارج می‌شود. با شروع رشد ترک کم کم سیگنال‌ها هم ظاهر می‌شوند.

در ادامه می‌بینیم که با پیشروی ترک دانسیته سیگنال‌های دریافتی کم و زیاد می‌شود به‌خصوص در مواقعی که ترک به‌صورت ناگهانی رشد پیدا می‌کند در این حالت تعداد سیگنال‌های دریافتی نیز زیادتر می‌گردد. این پدیده در حالتی که جلوی رشد ترک بدلیل پل الیافی (Fiber Bridging) گرفته شود، کاهش می‌یابد و سیگنال‌های کمتری در این وضعیت مشاهده می‌شود. اما بعد از اینکه نیرو به میزان ماکزیمم خود رسید همراه با رشد و پیشروی ترک اولیه، نیرو کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه نمودارهای جدایش لایه‌ای فوق در این است که به‌راحتی نمی‌توان در مورد نمونه‌های مختلف اظهار نظر کرد. لذا نیاز به استفاده از روش‌هایی است که بتواند این نمونه‌ها را از هم متمایز کند. برای این منظور از دیاگرام دامنه– زمان استمرار (Duration time) استفاده خواهد شد.

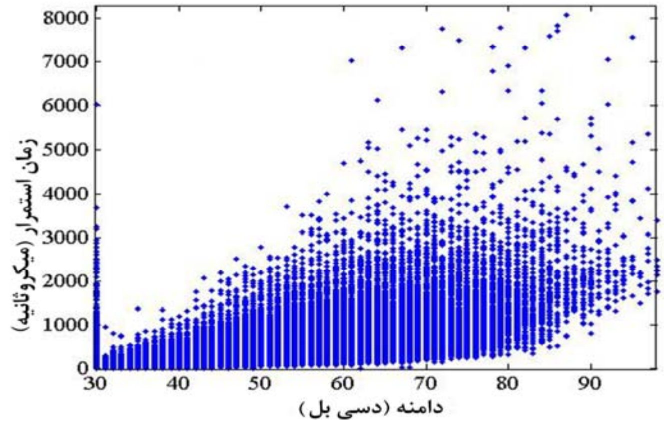
بر اساس یافته‌های قبلی دیدیم که دامنه امواج در ارتباط با نوع خرابی تغییر می‌کند. به‌طوری‌که خرابی رزین در کمترین دامنه و خرابی الیاف در بیشترین دامنه اتفاق می‌افتد. همچنین از دیاگرام شکل (۹) می‌توان فهمید که حین پیشروی ترک و ایجاد جدایش لایه‌ای، دامنه سیگنال‌های ثبت شده بین 30 dB تا 100 dB است که از طریق اطلاعات به‌دست آمده قبلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که دامنه‌های پایین مربوط به شکست رزین و جدایش الیاف از رزین و سیگنال‌های با دامنه بالاتر مربوط به شکست الیاف می‌باشد.

طبق این دیاگرام می‌توان نتیجه گرفت که رابطه بین شروع و رشد ریز ترک‌های رزین در دامنه های کم یا متوسط و زمان استمرار کوتاهتر صورت می‌گیرد. مدت استمرار بالاتر و دامنه‌های بیشتر هم در ارتباط با شکست الیاف است و در محدوده بین این دو خرابی، خرابی‌های جدایش الیاف از رزین را می‌توان جای داد.

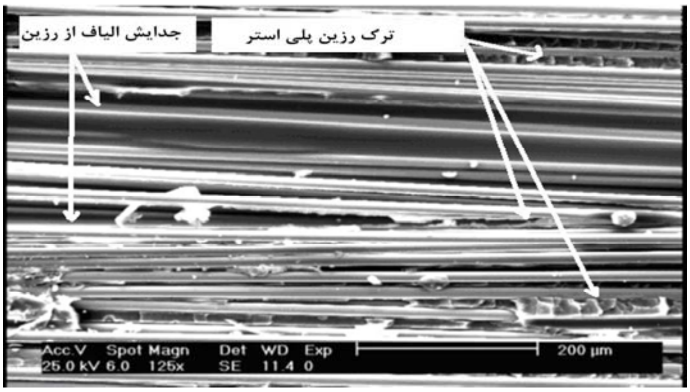
در ادامه می‌بینیم که در شکل (۱۰) دیاگرام دامنه– زمان استمرار به‌دست آمده از آزمایش آکوستیکی نمونه $[0,90,-45,+45,\ 0,90,-45,+45]_{2s}$ شبیه نمودار حاصل از $[0]_{8s}$ می‌باشد ولی سیگنال‌ها از نظر دامنه تا حدودی افزایش پیدا کرده‌اند. به عبارت دیگر در این مواد شکست رزین همراه با جدایش الیاف از رزین اتفاق افتاده است. در اشکال (۱۲و۱۱) تصویر SEM سطوح پس از جدایش لایه‌ای در نمونه‌های $[0]_{8s}$ و $[0,90,-45,+45,\ 0,90,-45,+45]_{2s}$ دیده می‌شود.



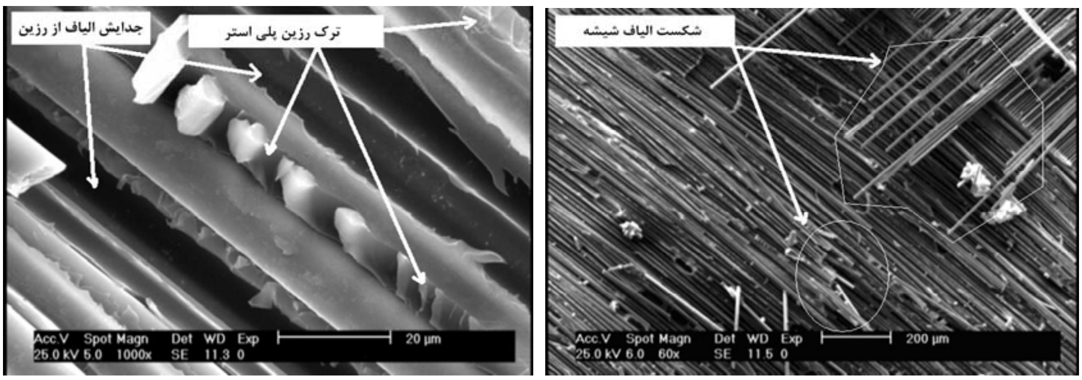
شکل ۹ نمودار زمان استمرار سیگنال در برابر دامنه برای نمونه $[0]_{8s}$



شکل ۱۰ نمودار زمان استمرار سیگنال در برابر دامنه برای نمونه $[0,90,-45,+45, 0,90,-45,+45]_{2s}$



شکل ۱۱ تصویر SEM خرابی‌های ایجاد شده در سطح نمونه‌های $[0]_{8s}$ در حین جدایش لایه‌ای



شکل ۱۲ تصویر SEM انواع خرابی‌ها در نمونه $[0,90,-45,+45 \;, 0,90,-45,+45]_{2s}$ در حین جدایش لایه‌ای

جدول ۲ درصد واریانس بردارهای ویژه برای قطعات مختلف

نمونه	PCA1%	PCA2%	PCA3%	PCA4%	PCA5%	PCA6%
$[0]_{8s}$	۵۷/۵۲۸	۳۶/۰۵۸	۵/۵۲۲	۰/۴۱۶	۰/۳۷۲	/۱۰۱/
$[0,90,-45,+45, 0,90,-45,+45]_{2s}$	۶۷/۶۹۶	۳۲/۲۳۷	۰/۰۵۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۹

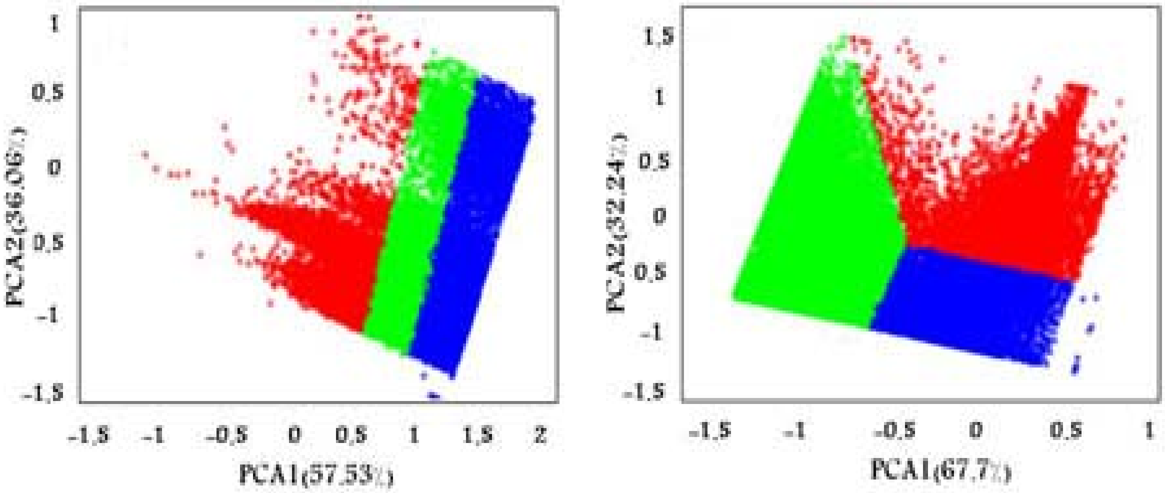
دسته‌بندی داده‌ها

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده در بخش‌های قبل می‌توان چنین استنباط کرد که نمونه‌های مختلف حین جدایش لایه‌ای دارای سه مکانیزم اصلی شکست الیاف، جدایش لایه‌ای و شکست زمینه می‌باشد. لذا در این بخش برای صحه گذاری از روش دسته‌بندی FCM به‌کمک PCA استفاده می‌شود. برای این کار ابتدا داده‌ها را در یک فضای شش بعدی (دامنه،کانت، زمان استمرار، انرژی و فرکانس) قرار می‌دهیم. روش دسته‌بندی بدین صورت است که:

- ابتدا هر ستون از داده‌های آکوستیکی بر اساس روش‌های آماری مورد نظر استاندارد سازی شده و سپس بین بازه [2+ 2-] نرمال می‌گردند.
- بر اساس فرمول‌های ارائه شده در روشPCA کواریانس بین داده‌ها حساب و سپس جهت بردارهای اصلی که در آنها بیشترین تغییرات ایجاد شده، پیدا می‌شود.
- به‌کمک تکنیک FCM داده‌ها در روی این بردارها نگاشت یا تصویر می‌شوند.
- با روش برگشتی داده‌های هر کلاس شناسایی شده و در دسته مربوطه قرار می‌گیرد.

طبق جدول (۲) شش بردار ویژه با واریانس‌های متفاوت برای داده‌های آکوستیکی نمونه‌های جدایش لایه‌ای ترسیم شده است که در هردو نمونه، دو بردار اول، درصد واریانس بالایی را به خود اختصاص داده‌اند، لذا برای تصویر داده‌ها از فضای شش بعدی به فضای دو بعدی این دو بردار به کار خواهند رفت. مثلاً در مورد نمونه $[0]_{8s}$، بردارهای ویژه اول و دوم با درصد واریانس نزدیک به ۹۳/۵۸۶، داده‌ها را می‌توانند با کمترین کاهش اطلاعات در فضای دو بعدی تصویر کنند. برای نمونه دوم نیز، به همین صورت مجموع دو بردار ویژه اول و دوم با درصد واریانس نزدیک به ۹۹/۹ مشخص می‌باشد.

بعد از کاهش ابعادی توسط PCA باید داده‌ها توسط FCM دسته‌بندی شوند که با توجه به تعداد مودهای اصلی خرابی سه دسته در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۳) با توجه به مبانی روش فازی دسته‌بندی انجام گرفته و داده‌های حاصل در کلاس‌های مربوطه قرار گرفته‌اند. در این شکل داده‌ها در محورهایی که مربوط به بردارهای ویژه با بیشترین واریانس می‌باشد نشان داده شده‌اند که در این فضای دو بعدی با روش فازی دسته‌بندی صورت گرفته است. در روش فازی ابتدا مرکز کلاس برای هر دسته معین می‌شوند و سپس بر اساس روش‌های تکراری مورد نظر و مینیمم کردن تابع هدف، بهترین مرکز دسته‌بندی برای داده‌ها حاصل می‌شود؛ سپس داده‌هایی که به هر یک از این مرکز کلاس‌ها نزدیک باشند، به عنوان داده‌های آن کلاس در نظر گرفته می‌شوند. قرار گرفتن تمامی داده‌ها در داخل دسته‌های انتخاب شده تأییدی بر کارایی تکنیک دسته‌بندی و صحت داده‌های اکوستیکی می‌باشد.



شکل ۱۳ دسته‌بندی با روش فازی برای داده‌های حاصل از آنالیز اجزا اصلی برای نمونه‌های
الف) $[0]_{8s}$ ب) $[0,90,-45,+45, 0,90,-45,+45]_{2s}$

نتیجه‌گیری

در این کار مودهای خرابی در حین جدایش لایه‌ای در کامپوزیت های شیشه- پلی استر با روش غیر مخرب AE مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مکانیزم جدایش لایه‌ای در این نوع کامپوزیت ها بسته به نوع لایه چینی و همچنین الیاف به‌کار برده شده (تک جهته یا دو جهته) متفاوت می‌باشد.

آنالیز داده‌ها برای الیاف در داخل رزین در جهت بارگذاری و عمود بر جهت بارگذاری وجود مکانیزم‌های متفاوت شکست را نشان می‌دهد؛ به طوری که برای الیاف در جهت بارگذاری شکست الیاف و زمینه غالب بوده در حالی‌که برای الیاف در جهت عمود بر بارگذاری در مرحله اول فرایند کشش، شکست زمینه به همراه جدایش الیاف از زمینه غالب می‌باشد و در مراحل نهایی شکست الیاف نیز قابل ملاحظه می‌باشد.

جهت پیدا کردن نوع خرابی‌ها در جدایش لایه‌ای استفاده از تکنیک دسته‌بندی فازی مفید واقع شد. در این کار به‌خاطر بالا بودن متغیرهای مربوط به سیگنال‌های آکوستیکی و برای اینکه بتوان داده‌ها را در یک فضای دو بعدی مشاهده کرد، از روش آنالیز اجزا اصلی بهره گرفته شده که با کمترین کاهش در اطلاعات داده‌ها، آنها را می‌تواند در فضای دو بعدی تصویر کند. نتایج به‌دست آمده از ترکیب روش فازی و روش آنالیز اجزا اصلی نشان می‌هد که با نتایج حاصل از روش‌های دیگر از جمله تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مطابقت دارد.

مراجع

1. Akovali, G., "*Handhook of Composite Fabrication*", UK, Rapra Technology, (2001).
2. Bussiba, A., Kupiec, M., Ifergane, S., Piat, R. and Bohlke, T., "Damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique", *Composites Science and Technology*, Vol.68, pp. 1144–1155, (2008).

3. Hirai, T., Bekris, N., Coad, J.P., Grisolia, C., Linke, J., Maier, H., Matthews, G.F., Philipps, V. and Wessel, E., "Failure modes of vacuum plasma spray tungsten coating created on carbon fibre composites under thermal loads", *Journal of Nuclear Materials*, Vol.392, pp. 40-44, (2009).
4. Minak, G., Morelli, P. and Zucchelli, A., "Fatigue residual strength of circular laminate graphite–epoxy composite plates damaged by transverse load", *Composites Science and Technology*, Vol.69, pp. 1358-1363, (2009).
5. Sorensen, B.F. and Jacobsen, T.K., "Characterizing delamination of fibre composites by mixed mode cohesive laws", Composites Science and Technology, Vol.69, pp. 445-456, (2009).
6. Marat-Mendes, R.M. and Manuel, M.F., "Failure criteria for mixed mode delamination in glass fibre epoxy composites", *Composite Structures*, Vol.92, Issue 9, pp. 2292-2298, (2010).
7. Loutas, T.H. and Kostopoulos, V., "Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites: Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part II: Acousto–ultrasonics monitoring of damage development", *Composites Science and Technology*, Vol.69, pp. 273–283, (2009).
8. Kaewwaewnoi, W., Prateepasen, A. and Kaewtrakulpong, P., "Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage", *Measurement*, Vol.43, pp. 274-282, (2010).
9. ASTM E610-98A, "Definitions of Terms Relating to Acoustic Emission",
10. Refahi, Oskouei, A. Ahmadi, M., "Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites", *Journal of Composite Materials*, Vol.44, pp. 793–807, (2010).
11. Sung-Choong, W. and Nak-Sam, C., "Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events", *Composites Science and Technology*, Vol.67, pp. 1451–1458, (2009).
12. Marec, A., Thomasa, J. H. and Guerjouma, R. El., "Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data ", *Mechanical systems and signal processing*, Vol.22, pp. 1441–1464, (2008).
13. Bezdek, J.C., "*Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*", Plenum Press, New York, (1981).
14. Omkar, S.N., Suresh, S., Raghavendra, T.R. and Mani, V., "Acoustic emission signal classification using fuzzy C-means clustering", *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP02)* , Vol.4, Orchid Country Club, Singapore, (2002) .

15. Bohse, J., "Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites", *Composites Science and Technology*, Vol.60, pp. 1213-1226, (2000).
16. Siron, O., Chollon, G., Tsuda, H., Yamauchi, H., Maeda, K. and Kosaka, K., "Microstructural and mechanical properties of filler-added coal-tar pitch-based C/C composites: the damage and fracture process in correlation with AE waveform parameters", *Carbon*, Vol.38, pp. 1369–1389, (2000).